

套作大豆补偿生长能力综合分析及其鉴定指标的筛选

吴雨珊¹, 龚万灼², 刘鑫¹, 武晓玲¹, 杨峰¹, 王小春¹, 刘卫国¹, 雍太文¹, 杨文钰^{1*}

(1. 四川农业大学农学院 / 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 成都, 611130;

2. 重庆市农业科学院特色作物研究所, 重庆, 402160)

摘要:为探讨套作复光后大豆补偿生长能力的评价方法, 比较不同大豆品系补偿生长能力差异, 本研究以 136 个大豆品系为材料, 在田间设置 2 个处理, 即不遮荫和遮荫 + 光照恢复。于取消遮阳网当日和取消后 30d 共测定了 14 项形态指标, 成熟期调查每个大豆品种(系)的单株产量。根据遮荫 + 光照恢复处理和不遮荫处理计算各品种各单项指标的补偿系数, 采用主成分分析、隶属函数法、聚类分析和逐步回归分析方法, 对大豆的补偿生长能力进行综合评价。结果表明, 主成分分析将 14 个单项指标转换为 4 个相互独立的综合指标; 通过隶属函数计算补偿能力综合得分(D 值), 并对其进行聚类分析, 将 136 份大豆品种按照补偿生长能力强弱分为 5 大类群, 其中第Ⅵ类群(10 个材料)补偿生长能力较强, 产量较高。通过逐步回归建立套作大豆补偿生长能力评价数学模型, $D = -1.314 + 1.110 X_4 + 0.623 X_7 + 0.831 X_1 + 0.642 X_9$, $R^2 = 0.990$, 并筛选出光照恢复后地上部总干重、叶面积、SPAD、中间节粗作为套作大豆补偿生长能力的主要鉴定指标。

关键词:大豆; 套作; 补偿生长; 主成分分析; 隶属函数法; 聚类分析; 逐步回归

中图分类号: S565.101 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9084(2016)04-0000-09

Comprehensive analysis and screening of compensation ability evaluation indicators for soybeans in relay strip intercropping system

WU Yu-shan¹, GONG Wan-zhuo², LIU Xin¹, WU Xiao-ling¹, YANG Feng¹,

WANG Xiao-chun¹, LIU Wei-guo¹, YONG Tai-wen¹, YANG Wen-yu^{1*}

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China;

2. Characteristic Crops Research Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: To explore the methods on evaluating and analyzing compensation growth ability, and to compare difference among soybean cultivars in light recovery period in relay intercropping, 136 soybean cultivars (lines) were planted in a field experiment under natural light condition and shade + light recovery condition. 14 morphology traits were investigated on 30 days after light recovery, the yield of soybean per plant was investigated at the mature period. Principal component analysis, membership function method, cluster analysis and stepwise regression analysis were used to comprehensively evaluate the compensation growth ability based on compensation coefficient of all indexes calculated from both treatments. Results showed that 4 independent comprehensive components were extracted from 14 single indexes by principal component analysis. 136 soybean cultivars (lines) were divided into 5 groups, the compensation growth ability of the VI group (10 cultivars) showed the strongest compensation growth ability and the highest yield. The mathematical evaluation model for soybean compensation growth ability was established as $D = -1.314 + 1.110 X_4 + 0.623 X_7 + 0.831 X_1 + 0.642 X_9$, ($R^2 = 0.990$). Based on the model, aboveground dry weight, leaf area, SPAD, and middle section diameter after light recovery could be used for iden-

收稿日期: 2015-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(31171476); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-PS19)

作者简介: 吴雨珊(1990-), 女, 博士研究生, 研究方向为大豆栽培生理, E-mail: wuys513@foxmail.com

* 通讯作者: 杨文钰(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为作物栽培生理, E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn

tification index of soybean varieties to compensation growth ability.

Key words: Soybean; Relay strip intercropping; Compensation growth; Principal components analysis; Membership function method; Hierarchical cluster analysis; Stepwise regression analysis method

大豆是我国重要的粮、油、饲兼用作物,随着国内需求的不断增加和种植面积的萎缩,供需矛盾日益突出。近年来,玉米-大豆带状套作复合种植发展迅速,对增加我国大豆总产量,促进大豆产业发展具有重要作用^[1]。在玉米-大豆带状套作模式下,大豆营养生长阶段与玉米共生,生长发育受玉米遮荫影响;玉米收获后,荫蔽解除,大豆恢复正常光照条件,此时的补偿生长对产量形成具有重要作用^[2]。补偿是指作物在解除胁迫压力后生理水平上产生的一种有利于作物生长发育和产量形成的能力^[3],作物在解除淹水^[4,5]、弱光^[6~8]、干旱^[9,10]等胁迫后均具有补偿生长效应。在中国,大豆种质资源丰富,但适合玉米-大豆带状套作的补偿生长能力强的材料严重缺乏,因此,合理评价大豆种质资源的补偿生长能力并确定补偿生长的鉴定指标,对选育高产品种、提高套作大豆产量具有重要意义。有关植物解除弱光胁迫后补偿生长能力评估的研究已有报道,如叶绿体数量增加,叶片变厚^[6],抗氧化酶活力增强^[7], P_n 、 F_v/F_m 先下降后回升^[8,11],蔗糖和淀粉含量增加^[12]等。但是关于大豆解除弱光胁迫后补偿生长能力鉴定指标方面的研究还比较少,宋艳霞等^[13]通过设置套作遮荫和复光发现,复光后15d套作大豆的初始荧光(F_0)、PS II 最大光化学量子产

量(F_v/F_m)、干物质迅速增加,较单作的差异明显减小。作物补偿生长是一个复杂的综合性状,与形态、生理、生化和产量等多个性状有关,并且每个性状对补偿生长所起的作用并不相同,因此,用单一指标或多个指标的平均系数,均不能准确地评价补偿生长能力。前人对套作大豆补偿生长能力的研究多以单项指标衡量,难以全面客观地反映其补偿生长能力。本研究采用多种多元分析方法,以各形态指标的补偿系数计算补偿生长能力综合评价价值,并对不同基因型大豆进行评价,确定补偿生长能力鉴定指标,同时建立补偿生长能力数学评价模型,为筛选补偿生长能力较强的大豆资源、创新培育高产大豆品种提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2013年6月-8月在四川农业大学雅安校区教学科研园区进行。试验地土壤全氮2.79g/kg,全磷0.383g/kg,全钾12.89g/kg,速效氮168.6mg/kg,速效磷81.3mg/kg,速效钾140.1mg/kg,有机质3.32%。选取来自14个省大豆品种(系)136个(表1)。

表 1 供试大豆材料信息
Table 1 Varieties used in this experiment

品种 Variety	生育期 Growth period/d	来源 Origin	品种 Variety	生育期 Growth period/d	来源 Origin
南豆 12 Nandou 12	134	四川 Sichuan	南 256 - 1 Nan256 - 1	141	四川 Sichuan
黄皮豆 Huangpidou	130	重庆 Chongqing	小黄豆 2 Xiaohuangdou2	141	四川 Sichuan
广 12 Guang 12	115	广州 Guangzhou	合哨小黄豆 Heshaoxiaohuangdou	141	四川 Sichuan
夏大豆 1 Xiadadou 1	130	云南 Yunnan	花脸豆 Hualiandou	134	四川 Sichuan
广 11 Guang 11	134	广州 Guangzhou	荣县大豆 Rongxiandadou	141	四川 Sichuan
八月黄 1 Bayuehuang 1	134	重庆 Chongqing	小黄豆 3 Xiaohuangdou3	134	四川 Sichuan
南农 X56 Nannong X56	130	南京 Nanjing	越南 Yuenan	134	越南 Vietnam
广 15 Guang 15	134	广州 Guangzhou	大颍豆 Dakedou	134	四川 Sichuan
粤夏 05 - 4 Yuexia 05 - 4	141	广州 Guangzhou	GWZ1	132	四川 Sichuan
九月黄 1 Jiuyuehuang 1	134	四川 Sichuan	菜豆 Caidou	134	日本 Japan
黄皮 Huangpi	115	贵州 Guizhou	球溪豆 Qiuxidou	134	四川 Sichuan
广 2 Guang 2	120	广州 Guangzhou	十月黄 Shiyuehuang	134	四川 Sichuan
螺丝豆 Luosidou	115	四川 Sichuan	德阳豆 Deyangdou	114	四川 Sichuan
大圆豆 Dayuandou	130	四川 Sichuan	平武大豆 - 2 Pingwudadou - 2	134	四川 Sichuan
广 5 Guang 5	141	广州 Guangzhou	大黄豆 Dahuangdou	134	四川 Sichuan
广 3 Guang 3	130	广州 Guangzhou	小黄豆 4 Xiaohuangdou4	122	四川 Sichuan
赶谷黄 Ganguhuang	134	四川 Sichuan	贡 109 Gong109	119	四川 Sichuan
广 14 Guang 14	122	广州 Guangzhou	扬尘豆 - 1 Ynagchen - 1	134	四川 Sichuan
广 9 Guang 9	122	广州 Guangzhou	铅山乌豆 Qianshanwudou	130	江西 Jiangxi

续表 1

品种 Variety	生育期 Growth period/d	来源 Origin	品种 Variety	生育期 Growth period/d	来源 Origin
灰豆 Huidou	134	四川 Sichuan	青皮田埂豆 Qingpitiantengdou	134	江西 Jiangxi
贡选 5 号 Gongxuan 5	134	四川 Sichuan	罗门豆 Luomendou	134	江西 Jiangxi
贡豆 2 号 Gongdou 2	122	四川 Sichuan	大黄珠 Dahuangzhu	130	江西 Jiangxi
九月黄 2 Jiuyuehuang 2	124	四川 Sichuan	宝山平顶豆 Baoshanpingdingdou	130	江西 Jiangxi
桂夏 3 号 Guixia 3	134	广西 Guangxi	崇明绿皮豆 Chongminglvpidou	102	上海 Shanghai
SY006	130	四川 Sichuan	SY001	134	上海 Shanghai
SY005	134	日本 Japan	宝山 791 Baoshan791	120	上海 Shanghai
威远黑豆 Weiyuanheidou	134	四川 Sichuan	八月豆 Bayuedou	134	上海 Shanghai
田埂豆 Tiangengdou	122	四川 Sichuan	宜山八月青 Yishanbayueqing	122	广西 Guangxi
毛豆 Maodou	134	四川 Sichuan	青豆 1 号 Qingdou 1	118	广西 Guangxi
细白毛豆 Xibaimaodou	134	四川 Sichuan	青立大豆 Qinglidadou	118	浙江 Zhejiang
小黄豆 1 Xiaohuangdou 1	134	四川 Sichuan	白香元 Baixiangyuan	118	浙江 Zhejiang
罗泉豆 Luoquandou	134	四川 Sichuan	SY002	118	浙江 Zhejiang
达州 1 号 Dazhou 1	134	四川 Sichuan	SY003	120	浙江 Zhejiang
9923④	134	重庆 Chongqing	SY004	124	江苏 Jiangsu
华夏 3 号 Huaxia 3	134	广州 Guangzhou	溧阳大子豆 Liyangdazidou	120	江苏 Jiangsu
本地八月黄 Bendibayuehuang	134	四川 Sichuan	瑞丽青豆 Ruiliqingdou	134	云南 Yunnan
贡秋豆 04 - 2 Gongqiudou04 - 2	122	四川 Sichuan	保山昌宁黄豆 Baoshanchangninghunagdou	122	云南 Yunnan
黔豆 6 号 Qiandou 6	114	贵州 Guizhou	雅安黑豆 Yaanheidou	118	四川 Sichuan
地方自留种 Difangziliuzhong	130	重庆 Chongqing	简阳绿皮豆 Jianyanglvpidou	120	四川 Sichuan
干田豆 Gantiandou	130	四川 Sichuan	潜山表河大豆 1 号 Qianshanbiaohedadou 1	120	安徽 Anhui
九月黄 3 Jiuyuehuang3	134	四川 Sichuan	简阳九月黄繁 2 Jianyangjiuyuehuangfan2	124	四川 Sichuan
南农 X54 NannongX54	120	南京 Nanjing	蒙庆 6 号 Mengqing 6	120	安徽 Anhui
猪腰子 Zhuyaozi	134	四川 Sichuan	特选 11 Texuan11	122	重庆 Chongqing
南 F044 - 255 NanF044 - 255	134	四川 Sichuan	黔县青豆 Yixianqingdou	130	安徽 Anhui
威远冬豆 Weiyuandongdou	134	四川 Sichuan	紫花豆 Zihuadou	134	山东 Shandong
九月黄 4 Jiuyuehuang4	134	四川 Sichuan	本地绿豆 Bendilvdou	134	四川 Sichuan
冬豆子 Dongdouzi	134	重庆 Chongqing	青阳早黄豆 Qingyangzaohuangdou	130	安徽 Anhui
广 1 Guang 1	130	广州 Guangzhou	北京豆 Beijingdou	130	北京 Beijing
NTS1007	134	澳大利亚 Australia	简阳九月黄繁 1 Jianyangjiuyuehuangfan1	122	四川 Sichuan
南冬抗 022 - 2 Nandongkang022 - 2	114	四川 Sichuan	大粒黄豆 Dalihuangdou	122	江西 Jiangxi
河南豆 Henandou	118	重庆 Chongqing	横丰大叶豆 Hengfengdayedou	122	江西 Jiangxi
贡秋 369 - 1 Gongqiu369 - 1	141	四川 Sichuan	上海慈菇青 Shanghaiciguqing	130	上海 Shanghai
细白毛豆 Xibaimaodou	134	四川 Sichuan	干不死 Ganbusi	130	四川 Sichuan
南 F05 - 62 NanF05 - 62	134	四川 Sichuan	上海八月黄 Shanghaibayuehuang	134	上海 Shanghai
黄壳豆 Huangkedou	134	四川 Sichuan	稻城去呷黄豆 Daochengqujiahuangdou	134	四川 Sichuan
黄壳早 Huangkehan	120	四川 Sichuan	务源严田毛青豆 Wuyuanyantianmaoqingdou	122	江西 Jiangxi
特选 13 Texuan13	130	重庆 Chongqing	南 032 - 4 Nan032 - 4	122	四川 Sichuan
南豆 021 - 1 Nandou021 - 1	130	四川 Sichuan	江浦黑大豆 Jiangpuheidadou	122	江苏 Jiangsu
贡秋豆 05 - 8 Gongqiudou05 - 8	134	四川 Sichuan	溧阳大乌黄豆 Liyangdawuhuangdou	117	江苏 Jiangsu
9923	130	重庆 Chongqing	牛佛大豆 Niufodadou	122	四川 Sichuan
冬大豆 Dongdadou	134	四川 Sichuan	永胜黑大豆 Yongshengheidadou	114	云南 Yunnan
贡选 1 号 Gongxuan 1	128	四川 Sichuan	金坛隔壁香 Jintangebixiang	122	江苏 Jiangsu
阴山豆 Yinshandou	138	四川 Sichuan	金坛晚黑豆 Jintanwanheidou	107	江苏 Jiangsu
小水白毛 Xiaoshuibaimao	128	四川 Sichuan	黑珍珠 Heizhenzhu	114	南京 Nanjing
小白毛 Xiaobaimao	138	四川 Sichuan	托良早 Tuoliangzao	114	江苏 Jiangsu
大白毛 Dabaimao	141	四川 Sichuan	GWZ2	109	四川 Sichuan
褐皮豆 Hepidou	134	四川 Sichuan	九月黄 5 Jiuyuehuang 5	122	四川 Sichuan
八月豆 Bayuedou	134	四川 Sichuan	龙结 1 号 Longjie 1	105	四川 Sichuan

1.2 试验设计

采用裂区设计,主区为光照处理,副区为品种(表1)。光照设置2个处理,即遮荫+光照恢复处理;在大豆播种地上搭建2m 高铁架,于大豆播种日采用透光率为60%的绿色遮阳网持续50d 模拟带状套作的共生期遮荫,对应玉米收获日取消遮阳网模拟光照恢复;不遮荫处理,模拟大豆单作。试验设2个重复。两个处理大豆的播种时间一致,6月11日播种,密度为9.9万株/hm²,每个品种种植2行,行长2m,行距0.5m,穴距0.2m,每穴2株。大豆生育期参照当地生产水平进行管理。

1.3 测定项目与方法

参照当地玉米大豆带状套作模式中的玉米收获日,于玉米收获日(DRL0)、收后30d(光照恢复后30d,DRL30)测定取样。单株测定大豆SPAD(X₁)、茎干重(X₂)、叶干重(X₃)、地上部总干重(X₄)、茎长(X₅)、第一节间粗(X₆)、叶面积(X₇)、分枝数(X₈)、中间节粗(X₉)、最低分枝高度(X₁₀)、主茎节数(X₁₁),计算茎长/地上部干重(X₁₂)、茎长/第一节间粗(X₁₃)、茎长/叶面积(X₁₄)。大豆成熟后各材料收获10株,调查单株产量(X₁₅)。

1.4 数据统计与分析

采用SPSS19.0和Microsoft Excel 2013软件进行数据整理和分析。

相关指标计算如下:
为表现遮荫和复光对大豆品种的影响程度,本研究采用补偿系数^[14]对各性状进行衡量。补偿系数=(处理性状值-对照性状值)/对照性状值×

100%(公式1)
各主因子的隶属函数值 U_{ij} :与产量呈正相关:
 $U_{ij} = (X_{ij} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$
与产量呈负相关: $U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$ (公式2)
 U_{ij} 表示第*i*个品种第*j*个指标补偿系数的隶属函数值, X_{ij} 表示第*i*个品种第*j*个指标补偿系数, X_{max} 、 X_{min} 分别表示所有参试品种中某一指标补偿系数中的最大值和最小值。
各主成分的权重 $W_i = P_i / \sum P_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ (公式3)

式中: P_i 为各品种第*i*个主因子的特征值
各品种补偿能力的综合得分*D*,公式为:
 $D = \sum [U(X_i) \times W_i]$ (公式4)
*D*值为各品种在荫蔽+恢复光照条件下由综合指标评价所得的补偿能力综合评价值,该值越高,补偿能力越强。

2 结果与分析

2.1 不同光照处理大豆生长差异比较

不同光照处理大豆生长存在较大差异,由表2可知,在DRL0(遮荫期间),遮荫处理的地上部总干重、单株叶面积、SPAD、中间节粗显著低于对照,说明遮荫严重影响了大豆的生长发育。DRL30(光照恢复30d),遮荫处理的SPAD已恢复到对照水平,虽然单株地上部总干重、单株叶面积和中间节粗仍然显著小于对照,但二者差异在减小,说明在解除遮荫后大豆存在补偿生长现象。

表2 不同遮荫处理下大豆生长差异比较
Table 2 Comparison of soybean agronomic traits under different shade treatment

时间 Time	处理 Treat.	地上部总干重 ADM/(g/plant)		单株叶面积 LA/(cm ² /plant)		SPAD		中间节粗 MSD/cm	
		Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV	Mean	CV
DRL0	Shade	3.19b	0.34	703b	0.37	34.41b	0.27	2.92b	0.44
	CK	9.11a	0.27	1204a	0.26	38.01a	0.22	5.13a	0.21
DRL30	Shade	20.12b	0.27	2501b	0.32	44.35a	0.25	4.56b	0.21
	CK	28.95a	0.22	2815a	0.30	44.75a	0.21	7.28a	0.13

注:DRL0、DRL30 分别表示光照恢复的当天和光照恢复后30d。小写字母表示在5%水平上差异显著。ADM:地上部总干重;LA:单株叶面积;MSD:中间节粗
Note:DRL0, DRL30 indicate the day of light recovery and 30 days after light recovery respectively. Lower case letters indicate significant difference at 5%. ADM:aboveground dry mass; LA:leaf area; MSD:middle section diameter

2.2 单项指标的补偿系数及其与产量的相关分析

从大豆各性状补偿系数与产量的相关系数来看(表3),产量分别与X₁(SPAD)、X₃(叶干重)、X₄(地上部总干重)、X₆(第一节间粗)、X₇(叶面积)、X₈(分枝数)、X₁₀(最低分枝高度)呈极显著正相关(r分别为:0.243**、0.503**、0.624**、0.328**、

0.574**、0.175**、0.320**),与X₅(茎长)、X₁₂(茎长/地上部总干重)、X₁₃(茎长/第一节间粗)、X₁₄(茎长/叶面积)呈极显著负相关(r分别为:-0.616**、-0.205**、-0.129**、-0.126**)。由于大豆的补偿生长是一个复杂的综合性状,因此需要利用多元统计方法进行进一步分析。

表 3 复光后大豆各性状补偿系数与产量的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between yield and compensation coefficient of agronomic traits after light recovery

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
X ₁														
X ₂	0.106													
X ₃	-0.051	0.744 **												
X ₄	0.105	0.904 **	0.769 **											
X ₅	-0.035	0.429 **	0.239 **	0.343 **										
X ₆	-0.138	0.383 **	0.297 **	0.443 **	0.108									
X ₇	-0.081	0.597 **	0.461 **	0.703 **	0.374 **	0.467 **								
X ₈	0.316 **	0.364 **	0.212 *	0.340 **	-0.053	0.282 **	0.180 *							
X ₉	0.261 **	0.699 **	0.497 **	0.660 **	0.137	0.355 **	0.463 **	0.415 **						
X ₁₀	0.109	0.233 **	0.163	0.143	0.205 *	-0.013	0.031	-0.15	0.310 **					
X ₁₁	0.048	0.555 **	0.397 **	0.441 **	0.472 **	0.115	0.354 **	0.208 *	0.517 **	0.256				
X ₁₂	-0.101	-0.526	-0.566	-0.702 **	0.377 **	-0.355 **	-0.401 **	-0.372 **	-0.500 **	0.028	-0.085			
X ₁₃	0.02	0.065 **	-0.035 *	-0.042	0.816 **	-0.439 **	-0.001	-0.272 **	-0.162	0.165	0.335 **	0.623 **		
X ₁₄	-0.062	-0.337	-0.258	-0.471 **	0.212 *	-0.371 **	-0.727 **	-0.262 **	-0.396 **	0.069	-0.096	0.624 **	0.459 **	
X ₁₅	0.243 **	0.016	0.503 **	0.624 **	-0.616 *	0.328 *	0.574 **	0.175 *	0.082	0.320 *	0.039	-0.205 *	-0.129 *	-0.126 *

注: X₁:SPAD, X₂:茎干重, X₃:叶干重, X₄:地上部总干重, X₅:茎长, X₆:第一节间粗, X₇:叶面积, X₈:分枝数, X₉:中间节粗, X₁₀:最低分枝高度, X₁₁:主茎节数, X₁₂:茎长/地上部干重, X₁₃:茎长/第一节间粗, X₁₄:茎长/叶面积, X₁₅:单株产量。* * 表示 P=0.01 水平相关, * 表示 P=0.05 水平相关
Note: X₁:SPAD, X₂:stem mass, X₃:leaf mass, X₄:aboveground dry mass, X₅:stem length, X₆:first section diameter, X₇:leaf area, X₈:branch number, X₉:middle section diameter, X₁₀:lowest branch height, X₁₁:node number on main stem, X₁₂:stem length/ aboveground dry mass, X₁₃:stem length/ first section diameter, X₁₄:stem length/ leaf area, X₁₅:yield per plant. * and ** indicate significance at 5% and 1% level, respectively

2.3 主成分分析

主成分分析可将原来多个彼此相关的单项指标转换成少数几个新的且彼此独立的综合指标。以各性状的耐荫系数(公式 1)为基础,计算出各主成分的特征向量和贡献率(表 4),同一指标在各因子中的最大绝对值所在位置即为其所属主成分。由表 4 可知,按照特征值大于 1,累计贡献比例为 75.56%,提取前 4 个主成分,基本上代表了 14 个原始指标的绝大部分信息,这样就把原来 14 个具有相互关联的单项指标转换为 4 个新的相互独立的综合指标。

第 1 主成分主要由茎干重、叶干重、地上部总干重、叶面积决定,相当于 5.292 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 35.59%;第 2 主成分主要由茎长、茎长/第一节间粗决定,相当于 2.809 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 18.81%;第 3 主成分主要由 SPAD 决定,相当于 1.417 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 11.52%;第 4 主成分主要由最低分枝高度决定,相当于 1.060 个原始指标的作用,可反映原始数据信息量的 9.639%。

表 4 参试大豆各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 4 Eigen vectors and contribution rate of leading principal components of soybean varieties

		主成分 Principle factors			
		CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄
特征值 Eigen value		5.292	2.809	1.417	1.060
贡献率 Contribution ratio/%		35.593	18.811	11.517	9.639
累积贡献率 Cumulative contribution ratio /%		35.593	54.404	65.921	75.559
特征向量 Eigen vector	X ₁	-0.112	-0.007	0.838 *	0.129
	X ₂	0.834 *	0.239	0.239	0.243
	X ₃	0.744 *	0.066	0.022	0.297
	X ₄	0.906 *	0.101	0.182	0.151
	X ₅	0.267	0.927 *	-0.062	0.026
	X ₆	0.637	-0.176	-0.108	-0.219
	X ₇	0.842 *	0.159	-0.097	-0.183
	X ₈	0.341	-0.105	0.713 *	-0.293
	X ₉	0.664	-0.017	0.432	0.339
	X ₁₀	0.075	0.110	-0.023	0.865 *
	X ₁₁	0.458	0.505	0.230	0.254
	X ₁₂	-0.683	0.579	-0.202	-0.101
	X ₁₃	-0.202	0.937 *	-0.049	0.113
	X ₁₄	-0.659	0.394	-0.053	0.211

注: * 表示某指标在各因子中的最大绝对值
Note: * Means the biggest absolute value of each index in all factors

2.4 补偿生长能力综合评价

2.4.1 隶属函数分析 根据公式 2 计算每一参试

材料各综合指标的隶属函数值(表 5,由于篇幅太大,只列出每类群部分材料数据)。对于同一综合

指标如 CI_1 而言,在光照恢复后 30d,黄皮豆的 $U(X_1)$ 最大,为 1.369,表明此品种在 CI_1 表现为补偿生长能力最强,而广 11 的 $U(X_1)$ 值最小,为 0.161,表明此品种在这一综合指标上表现为补偿生长能力最弱。

2.4.2 权重确定 根据各综合指标贡献率大小,获得 4 个综合指标的权重分别为 2.001、1.062、0.536和 0.401(表 4)。

2.4.3 综合评价及分类 根据补偿生长能力综合评价值 D 值对各参试材料的补偿生长能力进行排序(表 5,篇幅太大只列出部分材料的数据),其中雅安黑豆的 D 值最大,为 2.50,表明其补偿生长能力最强;崇明绿皮豆的 D 值最小,为 -0.001,表明其补偿生长能力最弱。

2.4.4 聚类分析及各类群特征分析 采用最大距离法对 D 值进行聚类分析(图 1),可将 136 个大豆材料划分为 5 类,各类大豆品种(系)农艺性状的平均值见表 6。从表 6 可以看出,第 I 类群包括 31 个品种(系),第 II 类群包括 69 个品种(系),第 III 类群 24 个品种(系),第 IV 类群包括 10 个品种(系),第 V 类群包括 2 个品种(系)。其中,第 V 类群在复光后的地上部干物质和叶面积最小,单株产量最低,说明取消遮荫后生长较慢,补偿生长能力较弱,导致产量较低;而第 IV 类群在复光后生长较为迅速,表现为地上部总干重和叶面积最大,分枝数和主茎节数最多,茎长/地上部干重和茎长/叶面积最小,说明他们补偿生长能力较强,最终获得较高产量。

表 5 部分参试材料的综合指标值、权重、 $U(X_j)$ 、D 值及分类

Table 5 Value of part material's comprehensive index (CI), index weight, $U(X_j)$, D, prediction (VP) and group											
材料 Materials	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	$u(X_1)$	$u(X_2)$	$u(X_3)$	$u(X_4)$	D 值 D Value	类群 Group	
南豆 12 Nandou 12	2.469	1.064	1.294	0.766	0.934	0.402	0.489	0.290	1.77	I	
八月黄 Bayuehuang	1.884	1.910	0.941	1.327	0.713	0.722	0.356	0.502	2.09	I	
大圆豆 Dayuandou	0.640	1.331	0.590	0.519	0.242	0.503	0.223	0.196	1.87	I	
九月黄 1 Jiuyuehuang 1	2.024	1.133	0.521	1.153	0.765	0.429	0.197	0.436	1.80	I	
桂夏 3 号 Guixia 3	1.825	1.184	0.888	0.778	0.690	0.448	0.336	0.294	1.97	I	
华夏 3 号 Huaxia 3	2.821	1.501	1.335	1.043	1.067	0.568	0.505	0.394	2.01	I	
黄皮豆 Huangpidou	0.722	0.787	0.926	0.302	0.273	0.298	0.350	0.114	1.71	II	
夏大豆 Xiadadou	1.965	1.626	0.883	1.444	0.743	0.615	0.334	0.546	1.50	II	
广 11 Guang11	0.426	1.443	0.706	0.736	0.161	0.546	0.267	0.278	1.42	II	
南农 X56 NannongX56	2.750	1.412	1.214	0.968	1.040	0.534	0.459	0.366	1.48	II	
粤夏 05-4 Yuexia05-4	2.248	1.622	1.405	0.646	0.850	0.613	0.531	0.244	1.54	II	
黄皮豆 Huangpidou	3.619	1.556	1.018	1.274	1.369	0.589	0.385	0.482	1.66	II	
广 12 Guang 12	1.549	1.210	0.780	0.682	0.586	0.458	0.295	0.258	0.80	III	
广 15 Guang 15	2.020	2.323	0.691	1.094	0.764	0.878	0.261	0.414	0.75	III	
九月黄 2 Jiuyuehuang 2	1.714	0.534	0.569	0.292	0.648	0.202	0.215	0.110	0.60	III	
螺丝豆 Luosidou	3.357	1.503	0.607	0.798	1.269	0.568	0.230	0.302	0.70	III	
广 5 Guang 5	1.705	1.796	0.559	0.873	0.645	0.679	0.211	0.330	0.90	III	
赶谷黄 Ganguhuang	2.670	1.425	0.673	0.510	1.010	0.539	0.255	0.193	0.54	III	
灰豆 Huidou	3.596	1.619	1.263	1.060	1.360	0.612	0.478	0.401	0.97	III	
细白毛豆 Xibaimaodou	2.045	1.137	0.869	0.490	0.773	0.430	0.329	0.185	2.42	IV	
贡秋豆 04-2 Gongqiudou04-2	2.263	0.873	0.840	0.631	0.856	0.330	0.318	0.239	2.49	IV	
阴山豆 Yinshandou	2.387	1.568	1.124	0.822	0.903	0.593	0.425	0.311	2.31	IV	
大颗豆 Dakedou	1.518	1.112	0.656	0.511	0.574	0.421	0.248	0.193	2.34	IV	
八月豆 Bayuedou	2.579	0.654	1.519	0.523	0.975	0.247	0.574	0.198	2.23	IV	
溧阳大子豆 Liyangdazidou	2.430	1.252	1.177	0.743	0.919	0.474	0.445	0.281	2.24	IV	
雅安黑豆 Yaanheidou	0.715	1.284	0.384	0.672	0.271	0.485	0.145	0.254	2.50	IV	
罗门豆 Luomendou	2.664	1.583	0.833	0.723	1.007	0.599	0.315	0.273	0.26	V	
崇明绿皮豆 Chongminglvpidou	1.271	1.659	0.651	0.770	0.481	0.627	0.246	0.291	-0.01	V	
权重 Weight					2.001	1.062	0.536	0.401			

表 6 复光后各类群大豆品种(系)农艺性状的平均值
Table 6 Mean value of agronomic traits of different Cluster soybean varieties in light recovery period

分类 Group	数目 Number	SPAD	SL /cm	FSD /cm	ADM /(g/plant)	LA /(m ² /plant)	BN	MSD /cm	LBH /cm	NM	SL /ADM	SL /ASM	SL /LA	Yield /(g/plant)
I	31	44.50	95.84	6.32	21.77	0.27	5.31	5.37	16.40	13.31	4.67	16.04	380.00	14.48
II	69	43.82	95.20	5.53	18.18	0.21	4.71	4.68	17.25	12.93	5.40	17.54	480.51	12.90
III	24	44.09	110.98	5.21	15.20	0.19	4.18	3.86	15.23	11.49	6.67	18.46	553.99	12.88
VI	10	45.61	99.36	6.35	25.14	0.32	5.33	5.65	17.88	14.03	4.56	17.77	357.35	14.73
V	2	43.74	111.91	5.01	13.07	0.15	3.67	3.24	23.13	10.58	8.48	22.32	746.42	11.66

注:SL:茎长,FSD:第一节粗,ADM:地上部总干重,LA:叶面积,BN:分枝数,MSD:中间节粗,LBH:最低分枝高,NM:主茎节数
Note:SL:stem length; FSD:first section diameter; ADM:aboveground dry mass; LA:leaf area; BN:branch number; MSD:middle section diameter; LBH:lowest branch height; NM:node number on main stem

2.5 回归分析及补偿能力鉴定指标的选择

为分析各单项指标与补偿能力之间的关系,筛选可靠的补偿生长能力鉴定指标,探讨可用于补偿能力评价的数学模型,以补偿能力综合评价值(D值)作因变量,各单项指标的补偿系数作自变量进行逐步回归分析,建立回归方程: $D = -1.314 + 1.110 X_4 + 0.623 X_7 + 0.831 X_1 + 0.642 X_9$ ($F = 652.86, P = 0.000\ 0, R^2 = 0.990$),经回归系数测验和决定系数验证,都达显著水平。表明方程中的4个指标对大豆的补偿生长具有显著影响,该方程可用于大豆补偿生长能力的评价。

3 讨论

3.1 复光对植物生长的影响

光是影响植物生长发育的重要因素,但自然界中的光环境是复杂多变的,比如林冠空隙的形成^[15],植物的修剪^[12]、间苗^[16]都会让植物突然暴露在增加的光照下,影响它的生长。有研究认为遮荫环境下生长的植物移至强光下时,会表现出光抑制现象,主要表现为迅速降低最大光化学效率(F_v/F_m)、最大光合速率以及最大叶绿素荧光^[17,18]。但在一定的恢复时间内,植物能增加叶片的抗氧化酶活性^[19],改变叶片的组织结构^[20]以及对氮的重新分配利用^[21,22]来达到重建其光合机制提高光合能力的目的^[6]。这种光适应又会表现为光合速率的升高、生物量增加、比叶面积降低^[23],相对生长速率提高^[24]等,从而实现植物的补偿生长。在套作系统中,后茬作物在前茬作物收获以后也能获得更多的光照,光合效率得到恢复,实现补偿生长^[25]。龚万灼等^[26]发现,在玉米-大豆带状套作模式中,大豆的补偿生长对产量的形成至关重要,吴雨珊^[27]等研究结果也表明,光照恢复后,大豆地上部干物质迅速增加,分配规律表现为“茎少叶多”,选择光照恢复期茎粗较大、叶干物质比例较大、茎长/地上部干

物质较小的大豆品种可以在套作下获得高产。

3.2 复光后补偿生长能力的评价方法

套作复光后,大豆的光合速率、抗氧化水平、叶片组织结构等生理性状均发生适应性改变,最终通过植株的形态特征和产量体现出来,所以本研究采用直观的形态特征和产量为评价指标,以期对评价大豆补偿能力的可操作性提供理论依据。目前关于作物解除弱光胁迫后补偿生长的多指标综合评价方法还未见报道,本研究通过借鉴和改进评价作物抗旱性^[28]、耐荫性^[29]、耐湿性^[30]的方法,评价了大豆在解除弱光胁迫后补偿生长能力。首先计算各大豆品种复光后各指标的补偿系数并与产量进行相关分析,明确复光后各性状与产量的相关性。其次对复光后各指标的补偿系数进行主成分分析,将14个单一指标转化为补偿生长贡献率最大的4个综合指标,结果发现地上部总干重和叶面积对补偿生长的贡献率最大,这与杨峰等^[31]发现复光后套作大豆地上部干物质有较大幅度增加的研究结果相一致。大豆补偿生长与总干重和叶面积关系密切的原因可能是当大豆从弱光转至自然光照下时,初始荧光(F_0)、 F_v/F_m 得到迅速的恢复,叶面积的大幅度增加能截获更多的光照,从而促进光合产物的积累^[13]。根据模糊隶属函数值,求得补偿能力综合得分D值,再将所有品种按照D值进行聚类分析,得到了补偿能力明显不同的5个类群。其中补偿生长能力最强的类群表现为,复光后地上部干重和叶面积较大、分枝数和主茎节数较多、茎长/地上部总干重和茎长/叶面积较小的特点。最后通过逐步回归分析,建立了可用于补偿能力评价的数学模型,并提出地上部总干重、叶面积、SPAD、中间节粗可作为评价补偿生长的关键指标。这与前人研究结果一致:光照恢复后,补偿能力较强的高产类型大豆,地上部干物质、叶面积、叶干重比例、茎粗均显著大于低产类型^[27]。故在鉴定中可有选择地测定这些指标,使

鉴定工作简单易行。

4 结论

对 136 个大豆材料解除弱光后的补偿生长能力进行了研究,得到补偿生长能力不同的 5 个类群,其中补偿生长能力最强的类群复光后表现为地上部总干重和叶面积最大、分枝数和主茎节数最多、茎长/地上部干物质和茎长/叶面积最小,产量最高。恢复光照后地上部总干重、叶面积、SPAD、中间节粗可以作为套作大豆补偿生长能力的鉴定指标。

参考文献:

[1] 杨文钰,雍太文,任万军,等. 发展套作大豆, 振兴大豆产业[J]. 大豆科学,2008,27(1):1-7.

[2] 王 一,杨文钰,张 霞,等. 不同生育时期遮荫对大豆形态性状和产量的影响[J]. 作物学报,2013. 39(10):1 871-1 879.

[3] 赵 明,李建国,张 宾,等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报,2006,32(10):1 566-1 573.

[4] Luo F L, Nagel K A, Scharr H, et al. Recovery dynamics of growth, photosynthesis and carbohydrate accumulation after de - submergence: a comparison between two wetland plants showing escape and quiescence strategies [J]. Annals of Botany,2011,107(1):49-63.

[5] Luo F L, Nagel K A, Zeng B, et al. Photosynthetic acclimation is important for post - submergence recovery of photosynthesis and growth in two riparian species[J]. Annals of Botany,2009,104(7):1 435-1 444.

[6] Oguchi R, Hikosaka K, Hiura T, et al. Costs and benefits of photosynthetic light acclimation by tree seedlings in response to gap formation[J]. Oecologia,2008,155(4):665-675.

[7] 李宏伟,李 滨,郑 琪,等. 小麦幼苗从低光到强光适应过程中光合和抗氧化酶变化[J]. 作物学报,2010(3):449-456.

[8] 李潮海,栾丽敏,王 群,等. 苗期遮光及光照转换对不同玉米杂交种光合效率的影响[J]. 作物学报,2005,31(3):381-385.

[9] 刘吉利,赵长星,吴 娜,等. 苗期干旱及复水对花生光合特性及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2011(3):469-476.

[10] 王 磊,张 彤,丁圣彦. 干旱和复水对大豆光合生理生态特性的影响[J]. 生态学报,2006(7):2 073-2 078.

[11] Guo X R, Cao K F, Xu Z F. Acclimation to irradiance in seedlings of three tropical rain forest *Garcinia* species after simulated gap formation[J]. Photosynthetica,2006,44(2):193-201.

[12] Calatayud A, Roca D, Gorbe E, et al. Light acclimation in rose (*Rosa hybrida* cv. *Grand Gala*) leaves after pruning: Effects on chlorophyll a fluorescence, nitrate reductase, ammonium and carbohydrates [J]. Scientia Horticulturae,2007,111(2):152-159.

[13] 宋艳霞. 套作遮荫及复光对不同大豆品种光合、氮代谢及产量、品质的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2009.

[14] Ma J, Huang G B, Yang D L, et al. Dry matter remobilization and compensatory effects in various internodes of spring wheat under water stress[J]. Crop Science,2014,54(1):331-339.

[15] Naidu S, DeLucia E. Physiological and morphological acclimation of shade - grown tree seedlings to late - season canopy gap formation[J]. Plant Ecology,1998,138(1):27-40.

[16] Han Q, Araki M, Chiba Y. Acclimation to irradiance of leaf photosynthesis and associated nitrogen reallocation in photosynthetic apparatus in the year following thinning of a young stand of *Chamaecyparis obtusa*[J]. Photosynthetica,2006,44(4):523-529.

[17] Shimizu M, Ishida A, Tange T, et al. Leaf turnover and growth responses of shade - grown saplings of four Shorea rain forest species to a sudden increase in light[J]. Tree Physiology,2006,26(4):449-457.

[18] Parker W. Mohammed G. Photosynthetic acclimation of shade - grown red pine (*Pinus resinosa* Ait.) seedlings to a high light environment[J]. New Forests,2000,19(1):1-11.

[19] Burritt D, Mackenzie S. Antioxidant metabolism during acclimation of begonia $\times$ erythrophylla to high light levels [J]. Annals of Botany,2003,91(7):783-794.

[20] Jiang C D, Gao H Y, Zou Q, et al. Leaf orientation, photorespiration and xanthophyll cycle protect young soybean leaves against high irradiance in field[J]. Environmental and Experimental Botany,2006,55(1/2):87-96.

[21] Frak E, Le R X, Millard P,et al. Changes in total leaf nitrogen and partitioning of leaf nitrogen drive photosynthetic acclimation to light in fully developed walnut leaves[J]. Plant, Cell & Environment,2001,24(12):1 279-1 288.

[22] Ramalho J, Pons T, Groeneveld H, et al. Photosynthetic acclimation to high light conditions in mature leaves of *Coffea arabica* L.: role of xanthophylls, quenching mechanisms and nitrogen nutrition[J]. Functional Plant Biology,2000,27(1):43-51.

[23] Toledo A T, Swaine M D. Biomass allocation and photosynthetic responses of lianas and pioneer tree seedlings

to light[J]. *Acta Oecologica*,2008,34(1):38-49.

[24] Yamashita N, Ishida A, Kushima H, et al. Acclimation to sudden increase in light favoring an invasive over native trees in subtropical islands[J]. *Japan Oecologia*, 2000,125(3):412-419.

[25] Zhang L, van der Werf W, Bastiaans L, et al. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton[J]. *Field Crops Research*,2008,107(1):29-42.

[26] 龚万灼,吴雨珊,雍太文,等. 玉米-大豆带状套作中荫蔽及光照恢复对大豆生长特性与产量的影响[J]. *中国油料作物学报*,2015,37(4):475-480.

[27] 吴雨珊,龚万灼,廖敦平,等. 带状套作荫蔽及复光对不同大豆品种(系)生长及产量的影响[J]. *作物学报*,2015,41(11):1 740-1 747.

[28] 张彦军,苟作旺,王兴荣,等. 胡麻种质萌发期抗旱性综合评价[J]. *植物遗传资源学报*,2015,16(3):520-527.

[29] 李春红,姚兴东,鞠宝韬,等. 不同基因型大豆耐荫性分析及其鉴定指标的筛选[J]. *中国农业科学*,2014,47(15):2 927-2 939.

[30] 王 军,周美学,许如根,等. 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究[J]. *中国农业科学*,2007,40(10):2 145-2 152.

[31] 杨 峰,崔 亮,武晓玲,等. 不同空间配置套作大豆后期农学参数及光谱特征分析[J]. *中国油料作物学报*,2012,34(3):268-272.

(责任编辑:王丽芳)